

**Ф.В. НОВИКОВ**, д-р техн. наук, проф., ХНЭУ, Харьков;

**И.Е. ИВАНОВ**, канд. техн. наук, ПГТУ, Мариуполь.

## **ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ НАПЛАВЛЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКОЙ ТВЕРДОСТИ**

В работе обоснованы условия повышения производительности шлифования износостойких наплавленных материалов высокой твердости. Показана эффективность применения схем круглого продольного многопроходного и глубинного шлифования с увеличенной скоростью детали, реализующих сегментообразную форму среза отдельным зерном круга

У роботі обґрунтовані умови підвищення продуктивності шліфування зносостійких наплавлених матеріалів високої твердості. Показано ефективність застосування схем круглого поздовжнього багатопрохідного й глибинного шліфування зі збільшеною швидкістю деталі, які реалізують сегментну форму зрізу окремим зерном круга

The terms of increase of the productivity of polishing of wearproof naplavlennyykh materials of high hardness are in-process grounded. Efficiency of application of charts of the round longitudinal multi-pass and deep polishing is rotined with megascopic speed of detail, realizing the segmentoobraznyu form of cut by separate grain of circle

Ключевые слова: Наплавленные материалы, абразивный круг, шлифование, скорость детали, производительность обработки

**Введение.** Обработка поверхностей крупногабаритных деталей (типа тел вращения) тяжелого машиностроения и металлургического назначения с наплавленными материалами твердостью HRC 62–63 осуществляется, как правило, шлифованием, поскольку применение резцов из твердых сплавов и синтетических сверхтвердых материалов при съеме значительных неравномерных припусков приводит к образованию сколов на обрабатываемых поверхностях и снижению качества обработки. При этом процесс шлифования характеризуется низкой производительностью обработки и высоким износом абразивного круга, работающим в режиме самозатачивания с целью обеспечения высокой режущей способности и снижения энергоемкости обработки [1]. Применение алмазных кругов на высокопрочных металлических связках в связи с их интенсивным засаливанием даже в условиях непрерывной электроэрозионной правки оказалось малоэффективным [2,3]. Поэтому, по-прежнему, актуальной задачей является определение новых технологических возможностей увеличения производительности обработки наплавленных материалов. Цель работы – обоснование условий повышения эффективности процесса круглого шлифования деталей с износостойкими наплавленными материалами.

**Основное содержание работы.** Производительность обработки при круглом шлифовании по жесткой схеме может быть определена по зависимости [4]:

$Q = S_{мгн} \cdot V_{кр}$ , где  $S_{мгн} = n \cdot tg \gamma \cdot a_z^2$  – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м<sup>2</sup>;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с;  $n = k \cdot B \cdot l$  – количество одновременно работающих зерен круга;  $\gamma$  – половина угла при вершине конусообразного режущего зерна;  $a_z$  – средняя толщина среза отдельным зерном круга, м;  $k = k_0 \cdot a_z / b$  – поверхностная концентрация зерен круга, шт/м<sup>2</sup>;  $k_0$  – количество зерен, расположенных на единице площади рабочей поверхности круга, участвующих в резании, шт/м<sup>2</sup>;  $b$  – высота выступания режущего зерна над уровнем связки круга, м;  $B$  – ширина шлифования, м;  $l = \sqrt{2 \cdot t / \rho}$  – длина дуги контакта периферии круга с обрабатываемым материалом, м;  $t$  – глубина шлифования, м;  $\rho = 1/R_{кр} + 1/R_{дет}$ ;  $R_{кр}, R_{дет}$  – соответственно радиусы круга и детали, м. После несложных преобразований, имеем

$$Q = \frac{tg \gamma \cdot k_0 \cdot B \cdot a_z^3 \cdot V_{кр}}{b} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{\rho}}. \quad (1)$$

Зависимость (1) получена из условия шлифования одинаковыми по размерам и высоте выступания над уровнем связки зернами круга, что позволяет упростить расчет и получить принципиальное решение. Параметр  $a_z$  определяет прочностные свойства рабочей поверхности круга, обусловленные прочностью зерен и связки круга. Как следует из зависимости (1), увеличить производительность обработки  $Q$  можно увеличением  $\gamma$ ,  $k_0$ ,  $B$ ,  $a_z$ ,  $V_{кр}$ ,  $t$ ,  $R_{кр}, R_{дет}$  и уменьшением  $b$  (выполняя условие  $a_z = b$ ). Скорость детали  $V_{дет}$  при этом устанавливается по зависимости

$$V_{дет} = \frac{Q}{B \cdot t} = \frac{tg \gamma \cdot k_0 \cdot B \cdot a_z^3 \cdot V_{кр}}{b} \cdot \sqrt{\frac{2}{t \cdot \rho}}. \quad (2)$$

Как видно, с увеличением глубины шлифования  $t$  скорость детали  $V_{дет}$  должна уменьшаться, т.е. с точки зрения увеличения производительности обработки за счет максимального использования прочностных свойств рабочей поверхности круга эффективно применять глубинное шлифование с относительно небольшой скоростью детали и шириной шлифования, равной высоте круга.

В работе [5] показано, что при алмазном шлифовании справедливы зависимости:  $k_0 = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}$ ;  $b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}$ , где  $m$  – объемная концентрация зерен в круге (безразмерная величина, равная, например, для алмазного круга 100%-ной концентрации  $m = 100$ );  $\bar{X}$  – зернистость круга, м;  $\varepsilon$  – безразмерный коэффици-

ент, учитывающий степень выступления зерен над уровнем связки ( $\varepsilon < 1$ ). После преобразований зависимость (1) примет вид

$$Q = \frac{3 \cdot tg \gamma \cdot m \cdot B \cdot \alpha^3 \cdot V_{кр}}{200 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{\rho}}, \quad (3)$$

где  $\alpha = a_z / \bar{X}$  – безразмерная величина.

Наибольшее влияние на производительность обработки  $Q$  оказывает безразмерная величина  $\alpha$ , которая входит в зависимость (3) в третьей степени. Как показывает практика шлифования, с увеличением зернистости круга  $\bar{X}$  производительность обработки  $Q$  увеличивается. Из этого следует, что  $\alpha$  увеличивается с увеличением  $\bar{X}$ .

При круглом шлифовании по упругой схеме с фиксированным радиальным усилием  $P_y$  производительность обработки  $Q$  определится из условия  $n = P_y / P_0$ , где  $P_0 = \pi \cdot tg^2 \gamma \cdot a_z^2 \cdot HV$  – радиальное усилие, действующее на отдельное зерно круга, Н;  $HV$  – твердость (по Виккерсу) обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>. Тогда

$$Q = S_{мен} \cdot V_{кр} = n \cdot tg \gamma \cdot a_z^2 \cdot V_{кр} = \frac{P_y \cdot V_{кр}}{\pi \cdot tg \gamma \cdot HV}. \quad (4)$$

В отличие от зависимости (1), в зависимость (4) входит меньшее количество параметров, за счет которых можно увеличить  $Q$ . Основным путем увеличения  $Q$  следует рассматривать увеличение радиального усилия  $P_y$ , которое может изменяться в широких пределах. С увеличением угла  $\gamma$  (в связи с затуплением зерен круга) производительность обработки  $Q$  уменьшается. Следовательно, при шлифовании по упругой схеме важно в процессе постоянно поддерживать высокую режущую способность круга, что позволит обеспечить высокопроизводительный съем припуска. Исходя из зависимости (4), известные эффекты шлифования, связанные с применением крупнозернистых абразивных кругов, реализацией режима самозатачивания круга и т.д., обусловлены уменьшением угла  $\gamma$ , который является обобщающим параметром.

При шлифовании по жесткой схеме, исходя из зависимости (1), увеличение угла  $\gamma$  не ведет к уменьшению  $Q$ , а ведет к увеличению радиальной составляющей силы резания  $P_y$ , которая может быть определена из условия равенства значений  $Q$ , определяемых зависимостями (1) и (4):

$$P_y = \frac{\pi \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot k_0 \cdot B \cdot a_z^3 \cdot HV}{b} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{\rho}}. \quad (5)$$

Как видно, уменьшить  $P_y$  можно уменьшением параметров  $\gamma$ ,  $k_0$ ,  $B$ ,  $a_z$ ,  $t$ ,  $R_{\text{кр}}$ ,  $R_{\text{дет}}$ ,  $HV$  и увеличением  $b$ . Скорость круга  $V_{\text{кр}}$  на  $P_y$  влияния не оказывает. Следовательно, добиться увеличения производительности обработки  $Q$  (без увеличения радиальной составляющей силы резания  $P_y$ ) можно увеличением скорости круга  $V_{\text{кр}}$ . Все остальные параметры, входящие в зависимость (5), фактически в одинаковой мере (обратно пропорционально) влияют на  $Q$  и  $P_y$ . Поэтому увеличение  $Q$  всегда сопровождается увеличением  $P_y$ , а это ведет к повышению силовой и тепловой напряженности процесса шлифования и снижению качества обработки.

Зависимость (5), по сути, выражает связь между жесткой и упругой схемой шлифования, рассматривая параметр  $P_y$  как радиальное усилие при шлифовании по упругой схеме. Каждому значению глубины шлифования  $t$  (при шлифовании по жесткой схеме) соответствует конкретное значение  $P_y$  при шлифовании по упругой схеме. Чем больше  $t$ , тем больше  $P_y$ . Следовательно, одну и ту же производительность обработки  $Q$  можно обеспечить как при шлифовании по жесткой, так и по упругой схемам, устанавливая в соответствии с зависимостью (5) значения  $t$  и  $P_y$ . Для поддержания в процессе заданного значения  $a_z$ , скорость детали  $V_{\text{дет}}$  при шлифовании по жесткой схеме необходимо устанавливать по зависимости (2). При шлифовании по упругой схеме скорость детали  $V_{\text{дет}}$  также устанавливается по зависимости (2), выражая в ней глубину шлифования  $t$  через радиальное усилие  $P_y$  в соответствии с зависимостью (5):

$$V_{\text{дет}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot B \cdot V_{\text{кр}}}{P_y \cdot \rho} \cdot \left( \frac{\text{tg} \gamma \cdot k_0 \cdot a_z^3}{b} \right)^2. \quad (6)$$

Как видно, с увеличением радиального усилия  $P_y$  скорость детали  $V_{\text{дет}}$  уменьшается, также как и с увеличением глубины шлифования  $t$  при шлифовании по жесткой схеме. Параметры  $\gamma$ ,  $k_0$ ,  $B$ ,  $a_z$  и  $b$  влияют на  $V_{\text{дет}}$  в большей мере, чем при шлифовании по жесткой схеме.

Производительность обработки  $Q$  при шлифовании может быть определена на основе приближенной зависимости  $Q = n_0 \cdot g_0 / \tau_0$ , где  $n_0 = k \cdot B \cdot \pi \cdot D_{\text{кр}}$  – ко-

личество работающих зерен круга;  $D_{кр}$  – диаметр круга, м;  $\mathcal{Q}_0 = \frac{1}{3} \cdot l \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot a_z^2$  – объем риски-царапины, образованной от работы отдельного зерна, м<sup>3</sup>;  $\tau_0 = \pi \cdot D_{кр} / V_{кр}$  – время одного вращения круга, с. После преобразований производительность обработки  $Q$  определится

$$Q = \frac{\operatorname{tg} \gamma \cdot k_0 \cdot B \cdot a_z^3 \cdot V_{кр} \cdot l}{3 \cdot b}. \quad (7)$$

Зависимость (7) аналогична зависимости (1) для шлифования по схеме, показанной на рис. 1,а (глубинное шлифование), рассматривая длину дуги контакта периферии круга с обрабатываемым материалом (длину среза отдельным зерном) в виде  $l = \sqrt{2 \cdot t / \rho}$ . При шлифовании по схеме, показанной на рис. 1,б (многопроходное шлифование), глубина шлифования равна толщине среза  $a_z$ , тогда  $l = \sqrt{2 \cdot a_z / \rho}$ . В этом случае, очевидно, производительность обработки  $Q$  будет меньше, т.к.  $a_z < t$ . В работе [6] показано, что при шлифовании по данной схеме зерна проходят практически “след в след”, образуя неполные срезы, в результате чего вероятность участия зерен в резании меньше, чем при шлифовании по схеме, показанной на рис. 1,а. Поэтому режущие зерна в процессе шлифования менее нагружены и соответственно предельная (прочностная) толщина среза  $a_z$  больше – она может достигать значений глубины шлифования, устанавливаемой при многопроходном шлифовании. Это создает объективные предпосылки повышения производительности обработки  $Q$  за счет увеличения толщины среза  $a_z$ , которая входит в зависимость (7) с наибольшей степенью. На рис. 1 заштрихованным показана форма среза отдельным зерном круга. При глубинном шлифовании (рис. 1,а) она принимает запятообразную форму, а при многопроходном шлифовании (рис. 1,б) – сегментообразную форму. Для заданного значения  $a_z$  длина среза отдельным зерном  $l$  при глубинном шлифовании всегда больше, чем при многопроходном шлифовании. В последнем случае она будет увеличиваться с увеличением скорости детали  $V_{дет}$ , однако не существенно, поскольку  $V_{дет} \ll V_{кр}$ . В связи с этим в расчетах влияние  $V_{дет}$  на  $l = \sqrt{2 \cdot a_z / \rho}$  не учитывается.

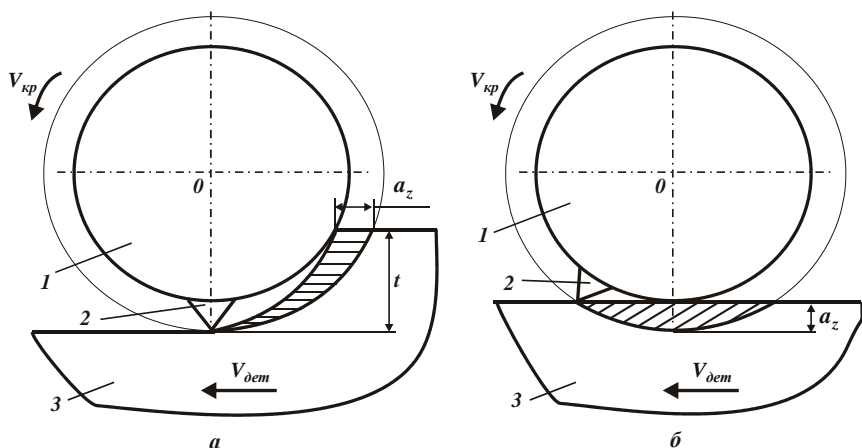


Рис. 1. Расчетные схемы параметров глубинного (а) и многопроходного (б) шлифования: 1 – круг; 2 – режущее зерно; 3 – обрабатываемый материал.

На рис. 2 приведены результаты численных расчетов переменных величин  $A_1 = a_z^3 \cdot \sqrt{t}$  (для схемы глубинного шлифования) и  $A_2 = a_z^{3.5}$  (для схемы многопроходного шлифования), входящих в зависимость (7). По сути, величины  $A_1$  и  $A_2$  определяют относительную производительность обработки  $Q$ . Кривая 1 на рис. 2 получена для  $a_z = 5$  мкм, а кривая 2 – для  $a_z = 5 \dots 10$  мкм (рассматривая  $t = a_z$ ). Как видно, с увеличением глубины шлифования  $t$  переменная величина  $A_2$  увеличивается более интенсивно и принимает большие значения, чем переменная величина  $A_1$ . Это свидетельствует о возможности повышения производительности обработки  $Q$  в условиях многопроходного шлифования за счет увеличения предельной (прочностной) толщины среза  $a_z$ , что достигается увеличением собственно прочности зерен и прочности удержания их в связке круга (путем увеличения твердости и зернистости круга). Как показывает практика круглого шлифования контактных поверхностей конусов и чаш (диаметром 5000 мм) засыпных аппаратов доменных печей с износостойким наплавленным материалом Пл-Нп 500Х40НС2РЦ-Б-С (ГОСТ 26467-85) твердостью HRC 58–59 [1], наилучшие результаты были получены при шлифовании абразивными кругами ПП 500×63×203 14А СТ2 ВФ на бакелитовой связке (усиленной стекловолокном) крупной зернистости: 16 – 18 (по FEPA размер зерна 1,6 – 1,2 мм соответственно). Данные круги обладают высокой режущей способностью, реализуют режим самозатачивания и не требуют правки вплоть до полного износа. Применение абразивных кругов большей твердости приводит к образованию на обрабатываемых поверхностях прижогов вследствие существенного увеличения силовой и тепловой напряженности процесса шлифования. Это хорошо согласуется с полученной зависимостью (5), исходя из которой с увеличением пре-

дельной (прочностной) толщины среза  $a_z$  радиальная составляющая силы резания  $P_y$  интенсивно возрастает.

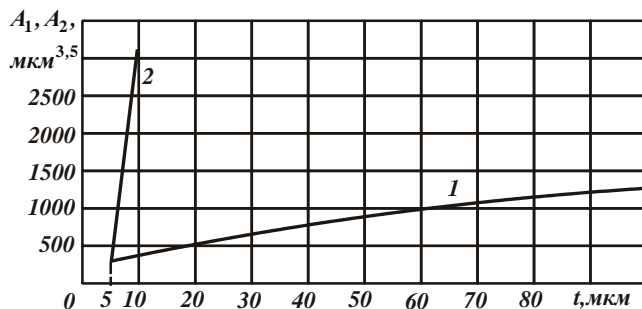


Рис. 2. Зависимости переменных величин  $A_1$  (1) и  $A_2$  (2) от глубины шлифования  $t$ .

Скорость детали  $V_{дет}$  при многопроходном шлифовании (рис. 1,б) определяется аналогично зависимости (2):

$$V_{дет} = \frac{tg \gamma \cdot k_0 \cdot B \cdot a_z^3 \cdot V_{кр}}{3 \cdot b} \cdot \sqrt{\frac{2}{a_z \cdot \rho}}. \quad (8)$$

За счет увеличения предельной (прочностной) толщины среза  $a_z$  скорость детали  $V_{дет}$  будет принимать большие значения, чем в случае глубинного шлифования (рис. 1,а). Таким образом, теоретически обоснованы возможности повышения производительности обработки  $Q$  путем применения схемы многопроходного шлифования с увеличенной скоростью детали  $V_{дет}$ , реализующей сегментообразную форму среза отдельным зерном круга. На практике данную схему шлифования можно реализовать методами круглого врезного и продольного шлифования. В первом случае обработка производится всей шириной круга (уступами) с постоянной скоростью радиальной подачи. Во втором случае обработка может производиться по схеме как многопроходного, так и глубинного шлифования (с небольшой долевой продольной подачей  $S_d \ll 1$  и увеличенной глубиной шлифования). Особенностью осуществления глубинного шлифования является образование на рабочей поверхности круга заборного конуса [6], который обеспечивает равномерную нагруженность режущих зерен и равномерный износ круга вдоль образующей.

**Выводы.** В работе получены приближенные зависимости для установления максимально возможной производительности обработки, обусловленную прочностными свойствами рабочей поверхности круга, которые обобщенно определяются предельной (прочностной) толщиной среза  $a_z$ , а также получены зависимости для определения параметров режима резания при шлифовании по жесткой и упругой схемам. Установлено, что основным условием повышения производительности

обработки является увеличение предельной (прочностной) толщины среза и реализация схем глубинного и многопроходного шлифования. Показано, что в условиях круглого многопроходного и глубинного шлифования с увеличенной скоростью детали  $V_{дет}$ , реализующей сегментообразную форму среза отдельным зерном круга, можно обеспечить увеличение предельной (прочностной) толщины среза и тем самым повысить производительность обработки. Для реализации данных условий шлифования наплавленных материалов высокой твердости целесообразно использовать крупнозернистые абразивные круги, работающие в режиме самозатачивания.

**Список литературы:** 1. Андилахай В.А. Выбор оптимальной схемы шлифования контактных (наплавленных) поверхностей крупногабаритных изделий металлургического назначения / В.А. Андилахай // Труды 16-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”. – 2010. – С. 119-124. 2. Рыбицкий В.А. Опыт внедрения алмазного шлифования деталей с защитными покрытиями / В.А. Рыбицкий. – К.: Общество “Знание” УССР, 1987. – 23 с. 3. Новиков Г.В. Закономерности повышения производительности алмазного шлифования деталей с наплавками и покрытиями / Г.В. Новиков, В.А. Андилахай // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы VII Международной научно-технической конференции: Курск. гос. техн. ун-т. Курск. – 2010. – С. 273-277. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. “Механика резания материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 5. Алмазно-абразивная обработка материалов: справочник / Под ред. проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с. 6. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 “Процессы механической обработки, станки и инструменты” / Ф.В. Новиков. – Одесса, 1995. – 36 с.

*Надійшла до редакції 04.05.11*